Journal of Agricultural Machinery

Homepage: https://jame.um.ac.ir

Research Article
Vol. 13, No. 3, 2023, p. 365-382

Drying Kinetics of White Seedless Grape Affected by High-Humidity Hot Air Impingement Blanching

H. Rezaei[1], M. Sadeghi[2*]

1- PhD Student, Department of Biosystems Engineering, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran
2- Associate Professor, Department of Biosystems Engineering, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran
(*- Corresponding Author Email: sadeghimor@iut.ac.ir)

https://doi.org/10.22067/jam.2022.78355.1122

Received: 21 August 2022 Revised: 21 November 2022 Accepted: 28 November 2022 Available Online: 28 November 2022	**How to cite this article:** Rezaei, H., & Sadeghi, M. (2023). Drying Kinetics of White Seedless Grape Affected by High-Humidity Hot Air Impingement Blanching. *Journal of Agricultural Machinery*, *13*(3), 365-382. (in Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jam.2022.78355.1122

Introduction

Due to the disadvantages of using chemical materials as pretreatment before grape drying, the application of non-chemical methods that not only take the environmental issues into account but also increase the drying rate and improve the quality of the produced raisins is vitally important. The high-humidity hot air impingement blanching (HHAIB) is one of the non-chemical methods that can be used as a suitable alternative for chemical pretreatment in grape drying. In this research, the design, construction, and evaluation of a high-humidity hot air impingement blanching system are discussed in terms of the drying kinetics of white seedless grapes. The results are compared against the control and chemical pretreatment.

Materials and Methods

High-humidity hot air impingement blanching (HHAIB) system

The HHAIB system is composed of the steam generator, steam transfer pipes, side channel pump, closing and opening valves, air recycling channel, electric air heater, hot-humid air transfer channel, pretreatment chamber, hot-humid air distribution chamber, nozzles, temperature and humidity sensors and controllers. The performance of the system depends on the humid air temperature, the output fluid velocity from the nozzle, the distance of the nozzles from the product surface, as well as the diameter and arrangement of the nozzles. In order to achieve optimal design of the nozzle array, the relationships existed for the heat transfer coefficient, air mass flow, and blowing power were considered.

Application of the HHAIB pretreatment and evaluation of its effect on the grape drying process

Experiments were conducted to investigate the effect of temperature and duration of HHAIB pretreatment on the kinetics of grape drying. A two-factor completely randomized factorial design with three replications was used to analyze the data.

According to the studies, the air at temperatures of 90, 100, and 110°C, a velocity of 10 m s^{-1}, and relative humidity in the range of 40-45% was applied to the product. Pretreatment durations of 30, 60, 90, 120, and 150 s were also considered. Experiments were conducted with three replicates and control treatment and acid pretreatment were used to compare the drying process. Due to the high quality of shade-dried raisins, this method was used to study the process.

The effect of the pretreatment duration on the drying kinetics of white seedless grapes was assessed by observing variations in moisture ratio and drying rate over time, as well as determining the effective diffusivity of water.

For the color evaluation of the produced raisins, chroma (C), hue angle $H°$, and total color difference (ΔE) parameters were calculated after measuring L^*, a^*, and b^* values.

Results and Discussion

The comparison of the drying process among the control, chemical, and HHAIB showed the positive efficacy

of HHAIB on the drying rate of grapes. Compared to fresh grapes, the increase in drying rate under the influence of HHAIB varied from 8% for a duration of 30 s at 90°C to 68% for a duration of 150 s at 110°C. The values of the diffusion coefficient of grapes for the HHAIB pretreatment at temperatures of 90, 100, and 110°C and durations of 30, 60, 90, 120, and 150 s, as well as for the control and chemical pretreatments were determined. The values of the coefficient changed from 2.28×10^{-10} m^2 s^{-1} for 30 s of applying pretreatment at 90°C to 3.53×10^{-10} m^2 s^{-1} for 150 s of applying the pretreatment at 110°C. The highest value of this coefficient (7.46×10^{-10} m^2 s^{-1}) was associated with the chemical pretreatment. The value of the diffusion coefficient increased with increasing temperature and duration of the HHAIB pretreatment. In general, this increase in the drying rate and the diffusion coefficient can be attributed to the effect of the HHAIB pretreatment on the texture and destruction of the cell wall, as well as the microcracks created on the skin of the grapes. Moreover, the findings reveal that, in comparison with the hot air temperature, the duration of the HHAIB pretreatment was more effective in enhancing the drying rate. Additionally, based on the color analysis, a temperature of 110°C and a duration range of 90-150 s were achieved as suitable conditions for applying pretreatment.

Conclusion

The HHAIB pretreatment, which combines the benefits of hot air blanching with jet technology, affects the texture and skin of grapes, accelerates the drying process, and increases the quality of the produced raisins. However, the correct application of this pretreatment depends on the proper design of the system and appropriate conditions, including duration, temperature, and relative humidity. The results of drying kinetics showed that the drying rate increased with an increase in the temperature and duration of the pretreatment. The findings indicate that the HHAIB pretreatment could improve the color indices of the raisins, resulting in an increase in the drying rate and acceptable quality of the final product. This provides a basis for the use of HHAIB on larger and industrial scales.

Keywords: Drying rate, Grapes, High-humidity hot air impingement blanching, Nonchemical pretreatment, Organic product

نشریه ماشین‌های کشاورزی
https://jame.um.ac.ir

مقاله پژوهشی

جلد ۱۳، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۲، ص ۳۸۲-۳۶۵

سینتیک خشک شدن انگور بی‌دانه سفید تحت تاثیر بلانچینگ جت برخوردی هوای داغ مرطوب

حسین رضائی[۱]، مرتضی صادقی[۲*]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۳۰
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۰۷

چکیده

برای اعمال پیش‌تیمار جت برخوردی هوای داغ مرطوب به انگور و مطالعه چگونگی تأثیر آن بر تسریع در روند خشک کردن آن، سامانه‌ای طراحی و ساخته شد و مورد ارزیابی قرار گرفت. در این پژوهش تأثیر دما و مدت اعمال پیش‌تیمار (دماهای ۹۰، ۱۰۰ و ۱۱۰ درجه سلسیوس و مدت‌های ۳۰، ۶۰، ۹۰، ۱۲۰ و ۱۵۰ ثانیه) در سرعت جت هوای ۱۰ متر بر ثانیه و رطوبت نسبی ۴۰ درصد در قالب طرح آزمایشی فاکتوریل ۵×۳ بر پایه طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار بر روند خشک شدن انگور به روش سایه‌خشک مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج بیانگر کاهش مدت خشک کردن با افزایش دما و مدت اعمال پیش‌تیمار بود. با افزایش مدت پیش‌تیمار از ۳۰ به ۱۵۰ ثانیه در دماهای ۹۰، ۱۰۰ و ۱۱۰ درجه سلسیوس سرعت خشک کردن به‌ترتیب ۳۱ درصد، ۳۷/۵ درصد و ۴۵ درصد افزایش پیدا کرد. به‌علاوه، مدت اعمال پیش‌تیمار نسبت به دما تأثیر بیشتری بر افزایش سرعت خشک کردن در محدوده‌های اعمال‌شده داشت. در مقایسه با انگور شاهد (بدون اعمال پیش‌تیمار)، افزایش سرعت خشک کردن تحت تأثیر جت برخوردی هوای داغ مرطوب از ۸ درصد برای مدت ۳۰ ثانیه در دمای ۹۰ درجه سلسیوس تا ۶۸ درصد برای مدت ۱۵۰ ثانیه در دمای ۱۱۰ درجه سلسیوس تغییر یافت. براساس آنالیز رنگ، شاخص‌های رنگی کشمش تولیدی با افزایش دما و مدت اعمال پیش‌تیمار بهبود پیدا کرد و دمای ۱۱۰ درجه سلسیوس و محدوده مدت ۱۵۰–۹۰ ثانیه به‌عنوان شرایط مناسب اعمال پیش‌تیمار به‌دست آمد.

واژه‌های کلیدی: انگور، پیش‌تیمار غیرشیمیایی، جت برخوردی هوای داغ مرطوب، محصول ارگانیک، نرخ خشک شدن

مقدمه

انگور (*Vitis vinifera* L.) محصول ارزشمندی است که دارای مواد معدنی، فیبرهای مغذی و ترکیبات مختلفی مانند ویتامین C، ویتامین B6 و آنتی‌اکسیدان‌ها است (Jayaprakasha, Singh, & Sakariah, 2001). مطابق با آمار سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد (FAO) ایران از نظر سطح زیر کشت و تولید انگور در زمره ۱۰ کشور اول جهان قرار دارد.

تبدیل انگور به کشمش مهم‌ترین روش فرآوری انگور است. به هر جهت، حضور موم در کوتیکول پوست مانعی برای خشک کردن انگور می‌باشد. بنابراین، خشک کردن آن نسبت به سایر محصولات بیولوژیک سخت‌تر است. معمولاً پیش‌تیمار شیمیایی به‌منظور اصلاح نفوذپذیری پوست انگور برای افزایش سرعت خشک شدن استفاده می‌شود. در این حالت انگور برای چند دقیقه در یک امولسیون آلکالین یا تیزاب (شامل اتیل اولئات و کربنات پتاسیم) فرو برده می‌شود که درنتیجه لایه مومی حل‌شده و مقاومت به انتشار آب از پوست کاهش پیدا می‌کند. به هر حال، این مواد ضمن رفع مسئله طولانی بودن مدت خشک کردن، معایبی نیز دارند که از جمله آن‌ها بقایای مواد شیمیایی در کشمش تولیدی و مشکل چگونگی برخورد با حجم زیادی از ماده شیمیایی استفاده شده می‌باشد.

سالانه به‌طور متوسط ۲۰۰ هزار تن کشمش تیزابی در ایران تولید می‌شود. با توجه به روش تهیه محلول تیزاب، برای تولید این مقدار کشمش تیزابی بیش از ۲۰ میلیون لیتر محلول تیزاب نیاز است که پس از مصرف در محیطزیست رها می‌شود. بنابراین، باید به دنبال روش‌های غیر شیمیایی ایمن، مؤثرتر و قابل‌کنترل بود که با در نظر گرفتن ملاحظات زیست‌محیطی هم سرعت خشک کردن را افزایش دهند و هم باعث افزایش کیفیت کشمش تولیدی شوند.

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران
۲- دانشیار، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: sadeghimor@iut.ac.ir)
https://doi.org/10.22067/jam.2022.78355.1122

علاوه بر مواد شیمیایی برخی پیش‌تیمارهای غیرشیمیایی (Dev, Padmini, Adedeji, Gariépy, & Raghavan, 2008) مانند امواج مایکروویو، پالس الکتریک، پیش‌تیمار فیزیکی و بلانچینگ حرارتی برای تسریع خشک کردن انگور مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. ماتئو و همکاران (Di Matteo, Cinquanta, Galiero, & Crescitelli, 2000) از خراش دادن پوست به‌عنوان یک پیش‌تیمار فیزیکی قبل از خشک کردن انگور استفاده کردند. نتایج نشان داد که سرعت خشک شدن تقریباً با پیش‌تیمارهای شیمیایی یکسان بود اما محصول نهایی تیره‌تر گزارش شد.

دو و همکاران (Dev *et al.*, 2008) پیش‌تیمار مایکروویو و پالس الکتریک را از نظر تأثیر بر سرعت خشک شدن و پارامترهای کیفی کشمش تولیدی با پیش‌تیمار شیمیایی مقایسه کردند. استفاده از ماده شیمیایی بیشترین تأثیر را بر سرعت خشک شدن داشت، لیکن کشمش تولیدی با استفاده از پیش‌تیمارهای پالس الکتریک و مایکروویو به‌طور معنی‌داری مواد جامد محلول کل بیشتری داشته و از نظر ظاهر و بازارپسندی نیز بهتر بود.

بلانچینگ حرارتی با حرارت دادن سریع میوه‌ها و سبزیجات در دما و مدت معین قبل از انجام فرآیندهای دیگر دارای اثراتی همچون افزایش نرخ خشک شدن و کیفیت محصول، غیرفعال کردن آنزیم‌های فاسدکننده، خارج کردن هوا از بافت گیاه، کاهش واکنش‌های قهوه‌ای شدن، حذف بقایای سموم و آفت‌کش‌ها، کاهش بار میکروبی و برخی اثرات دیگر می‌باشد. روش‌های متداول بلانچینگ حرارتی شامل روش سنتی بلانچینگ آب داغ، بلانچینگ بخار داغ، بلانچینگ مایکروویو، بلانچینگ اهمی، بلانچینگ امواج مادون قرمز و روش جدید بلانچینگ جت هوای داغ مرطوب، هستند.

در طول دو دهه گذشته فناوری جت هوا در فرآیندهای تولید محصولات کشاورزی و صنایع غذایی بیش از پیش مورد توجه واقع شده است. سرعت بالای برخورد هوا به سطح محصول یک بستر شبه سیال از هوای داغ ایجاد کرده و موجب نازک‌تر شدن لایه‌های مرزی حرارتی شده و بنابراین، نرخ انتقال حرارت و جرم را افزایش می‌دهد (Xiao *et al.*, 2010; Xiao & Mujumdar, 2014).

ضریب انتقال حرارت در روش جت برخوردی هوای داغ نسبت به سایر روش‌های تولید هوای اجباری بیشتر است. در صورت تزریق بخار به سامانه جت برخوری هوای داغ و ایجاد جت هوای داغ مرطوب این انتقال حرارت چندین برابر نیز خواهد شد (Schabel & Martin, 2010).

جت هوای داغ مرطوب یکی از روش‌های غیر شیمیایی محسوب می‌شود که فواید بلانچینگ هوای داغ را با تکنولوژی جت برخوردی ترکیب می‌کند. ضریب انتقال حرارت در این روش نسبت به بلانچینگ با بخار بیشتر و همچنین، نیاز به بخار در آن کم‌تر است. در نتیجه، این روش سبب میعان بر روی دیواره‌های سرد به علت اشباع بیش از حد نمی‌شود و با توجه به این مزایا برای صنعتی شدن بسیار مناسب است.

سرخ کردن چیپس سیب‌زمینی (Gao, Xiao, Liu, & Yang, 2008)، سرخ‌کردن اردک (Sui, Gao, Ni, & Fang, 2008)، پختن نان و کیک (Olsson, Trägårdh, & Ahrné, 2005)، پختن گوشت مرغ و گاو (Kondjoyan *et al.*, 2010)، بلانچینگ محصولات کشاورزی با ترکیب جت هوای داغ و بخار فوق گرم شامل بلانچینگ تکه‌های میوه سیب برای غیر فعال‌کردن پلی‌فنل اکسیداز (Bai, Gao, Xiao, Wang, & Zhang, 2013)، بلانچینگ کاهوی برش‌خورده تازه برای افزایش عمر ماندگاری (Rico *et al.*, 2008)، خشک کردن بذرها، سبزیجات، میوه‌ها، گیاهان دارویی و غذاها (Xiao & Mujumdar, 2014) از جمله کاربردهای جت هوا در کشاورزی و صنایع غذایی هستند

ژیائو و همکاران (Xiao *et al.*, 2012) تأثیر پیش‌تیمار برخورد جت هوای داغ مرطوب را بر تکه‌های سیب‌زمینی مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که علاوه بر افزایش سرعت خشک شدن تکه‌های سیب‌زمینی سفیدی آن‌ها نیز افزایش پیدا می‌کند.

بای و همکاران (Bai, Sun, Xiao, Mujumdar, & Gao, 2013) از پیش تیمار غیرشیمیایی جت برخوردی هوای داغ مرطوب به سطح حبه های انگور به‌منظور افزایش سرعت خشک کردن آن استفاده کردند. در این روش افزایش ضریب انتقال حرارت ۱۲ برابر وضعیتی بود که فقط هوای داغ خالص به سطح برخورد می‌کرد. بهترین عملکرد در دمای ۱۱۰ درجه سلسیوس و مدت ۹۰ ثانیه به‌کارگیری پیش تیمار به‌دست آمد که نه تنها باعث افزایش در سرعت خشک شدن انگور شد، بلکه کیفیت کشمش تولیدی نیز افزایش پیدا کرد.

وانگ و همکاران (Wang *et al.*, 2017a) اثر جت برخوردی هوای داغ مرطوب با مدت‌های تأثیر ۳۰، ۶۰، ۹۰، ۱۲۰، ۱۵۰، ۱۸۰، ۲۱۰ و ۲۴۰ ثانیه در سرعت هوای ۱۴ متر بر ثانیه، دمای ۱۱۰ درجه سلسیوس و رطوبت نسبی ۴۰-۳۵ درصد را بر کیفیت و نرخ خشک کردن فلفل قرمز مطالعه کردند. ایشان پارامترهای کیفی شامل رنگ، مقدار رنگدانه قرمز، ریز ساختار و بافت را اندازه‌گیری کردند. نتایج نشان داد که بعد از اعمال این پیش‌تیمار میکرو ترک‌هایی در سطح فلفل ایجاد می‌شد که باعث تسریع در روند خشک شدن می‌شدند. این پیش‌تیمار به‌طور مؤثری آنزیم‌های پلی‌فنل اکسیداز را غیرفعال می‌کرد. نتایج نشان داد که بلانچینگ بیش از حد با این پیش‌تیمار اثر معکوسی بر نرخ خشک کردن و محتوای رنگ دانه قرمز و خصوصیات بافت فلفل داشت.

لی یو و همکاران (Liu *et al.*, 2019) در پژوهشی اثر جت

برخوردی هوای داغ مرطوب را بر ویژگی‌های خشک کردن و خصوصیات کیفی گل‌های کلم بروکلی مطالعه کردند. در این تحقیق مدت‌های تأثیر ۳۰، ۶۰، ۹۰، ۱۲۰ و ۱۵۰ ثانیه، دماهای خشک کردن ۶۰، ۶۵، ۷۰ و ۷۵ درجه سلسیوس و سرعت‌های هوای ۶، ۹ و ۱۲ متر بر ثانیه به‌عنوان متغیرهای اعمال پیش‌تیمار در نظر گرفته شد. ایشان از شبکه عصبی مصنوعی و الگوریتم ماشین در قالب یادگیری عمیق[1] برای توصیف رفتار خشک کردن تحت شرایط بیان‌شده استفاده کردند. نتایج نشان داد استفاده از پیش‌تیمار به‌صورت مناسب نه تنها سرعت خشک کردن را به شدت افزایش داد بلکه پارامترهای کیفی و ویژگی‌های ظاهری محصول خشک‌شده نیز بهبود پیدا کرد.

وانگ و همکاران (Wang *et al.*, 2019) اثر جت برخوردی هوای داغ مرطوب با مدت‌های تأثیر ۳۰، ۶۰، ۹۰، ۱۲۰، ۱۵۰ ثانیه و دماهای خشک کردن ۶۰، ۷۰ و ۸۰ درجه سلسیوس را بر بافت، پارامترهای خشک‌کردن و رنگ تکه‌های سیب مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که با افزایش مدت تأثیر پیش‌تیمار سفتی بافت کاهش پیدا می‌کند. همچنین استفاده از این پیش‌تیمار سرعت خشک‌کردن را افزایش داده و از مقدار قهوه‌ای شدن می‌کاهد.

تأثیر پیش‌تیمار جت برخوردی هوای داغ مرطوب با مدت‌های تأثیر ۳۰، ۹۰ و ۱۵۰ ثانیه، دماهای ۱۰۰، ۱۱۰ و ۱۲۰ درجه سلسیوس و رطوبت‌های نسبی ۲۵، ۳۵ و ۴۵ درصد بر سینتیک خشک کردن، ویژگی‌های رنگ، شاخص قهوه‌ای شدن و محتوای فلاونوئید[2] کل سرهای گل داوودی خزنده توسط دای و همکاران (Dai *et al.*, 2020) مورد مطالعه قرار گرفت. استفاده از این پیش‌تیمار مدت خشک کردن را حدود ۵۲ درصد نسبت به تیمار دست‌نخورده کاهش داد. بیشترین رشد محتوای فلاونوئید در شرایط دمایی ۱۱۰ درجه سلسیوس، رطوبت نسبی ۴۵ درصد و مدت تأثیر ۱۵۰ ثانیه حاصل شد.

یکی از دلایل افزایش نرخ خشک‌شدن محصولاتی که تحت تأثیر پیش‌تیمار جت برخوردی هوای داغ مرطوب قرار می‌گیرند اثر این پیش‌تیمار بر بافت و پلی‌ساکاریدهای دیواره سلولی ازجمله پکتین می‌باشد. در این زمینه دنگ و همکاران (Deng *et al.*, 2018) نشان دادند که پیش‌تیمار جت هوای داغ مرطوب باعث نرم‌شدگی بافت و تخریب پلی‌ساکاریدهای پکتین دیواره سلولی زردآلو شد. زیلینسکا و همکاران (Zielinska *et al.*, 2022) در پژوهشی نشان دادند که جت برخوردی هوای داغ مرطوب تأثیر قابل‌توجهی بر حلالیت، ساختار و رئولوژی پکتین غلاف بامیه دارد.

براساس مطالب ذکرشده، پیش‌تیمار جت برخوردی هوای داغ مرطوب با توجه به مزایایی که در افزایش نرخ خشک کردن و کیفیت انگور می‌تواند داشته باشد، به‌عنوان جایگزینی مناسب برای پیش‌تیمار شیمیایی قابل استفاده است. برای اعمال پیش‌تیمار جت برخوردی هوای داغ مرطوب به انگور و مطالعه چگونگی تأثیر آن بر تسریع روند خشک کردن آن، سامانه‌ای مورد نیاز بود که در آن علاوه بر ایجاد جت برخوردی هوای داغ، درصد رطوبت معین نیز قابل‌کنترل باشد. با توجه به عدم وجود چنین سامانه‌ای در کشور، در این پژوهش ابتدا به طراحی و ساخت آن پرداخته شده و سپس با اعمال پیش‌تیمار مورد نظر در شرایط مختلف، به ارزیابی روند سایه خشک شدن انگور تحت تأثیر پیش‌تیمار و مقایسه نتایج با پیش‌تیمار مرسوم پرداخته شد.

مواد و روش‌ها

طراحی و ساخت سامانه اعمال پیش‌تیمار جت برخوردی هوای داغ مرطوب

در شکل ۱ نمای کلی از سامانه پیش‌تیمار جت برخوردی هوای داغ مرطوب و قسمت‌های مختلف آن نشان داده شده است. این سامانه شامل مولد بخار، کنترل‌کننده تناسبی–انتگرال‌گیر– مشتق‌گیر، دمنده، گرمکن الکتریکی، محفظه اعمال پیش‌تیمار، نازل‌های مدور، حسگر دما، حسگر کنترل رطوبت و دما، کانال‌های انتقال هوا، شیرها و سینی قرارگیری محصول می‌باشد.

همان‌طور که اشاره شد سامانه جت برخوردی هوای داغ مرطوب دارای یک سری از نازل‌ها می‌باشد که سیال عامل را با سرعت بالا به سطح محصول می‌دمند. عملکرد این سامانه به دمای هوا، سرعت هوای خروجی از نازل‌ها، قطر نازل‌ها و فاصله نازل‌ها از سطح محصول و نحوه چیدمان نازل‌ها وابسته است. برای طراحی و ساخت سامانه پیش‌تیمار جت هوای داغ از روابط مربوط به ضریب انتقال حرارت، جریان جرمی هوا و توان دمنده برای طراحی بهینه سیستم نازل‌ها استفاده شد. با توجه به تزریق بخار به سیستم جت برخوردی هوای داغ امکان تنظیم دمای هوای داغ و درصد رطوبت به‌صورت جداگانه وجود دارد. در محفظه اعمال پیش‌تیمار امکان تنظیم فاصله محصول از نازل‌ها و همچنین تغییر نوع و فاصله نازل‌ها از یکدیگر با تعویض صفحه نازل‌ها وجود دارد. به‌منظور مطالعه نحوه عملکرد دستگاه، قبل از ساخت، بخش‌هایی از آن در نرم‌افزار کامسول شبیه‌سازی شد. در ادامه به معرفی و مراحل طراحی و ساخت قسمت‌های مختلف سامانه پرداخته می‌شود.

سامانه جت برخوردی هوای داغ مرطوب را می‌توان به بخش ایجادکننده جت برخوردی هوای داغ مرطوب و بخش مولد بخار تقسیم‌بندی کرد. در شکل ۲ اصل اساسی ایجاد کردن جت هوای داغ مرطوب با استفاده از آرایه‌ای از نازل‌ها نشان داده شده است. این بخش مشابه خشک‌کن‌های جت برخوردی می‌باشد. هوای مرطوب با دمای اولیه T_a در یک مبدل حرارتی تا دمای T_0 گرم می‌شود که این

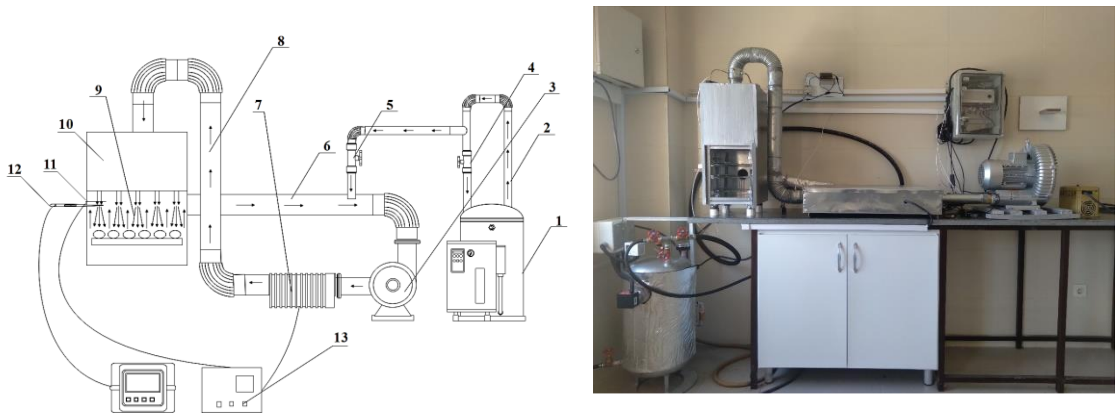
1- Deep learning
2- Flavonoids

گرم شدن به انرژی $\dot{H}_0$ نیاز دارد. هوای گرم‌شده با دمنده و از طریق آرایه نازل‌ها به‌منظور اعمال پیش‌تیمار به سطح محصول دمیده می‌شود. انرژی مورد نیاز برای گرم‌کردن هوای مرطوب از رابطه‌های (۱) و (۲) محاسبه شد.

$$H_0 = \rho_0 \dot{V}_0 c_P (T_0 - T_a) \quad (۱)$$

$$\dot{V}_0 = n \frac{\pi}{4} d^2 w \quad (۲)$$

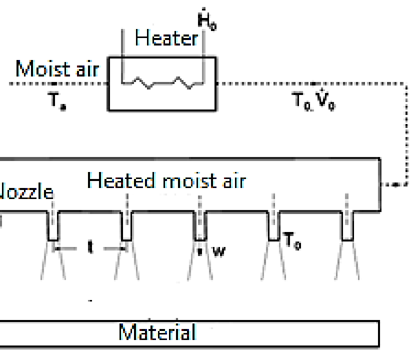
که، T_0 دمای هوای داغ مرطوب (K)، T_a دمای هوای مرطوب (K)، c_p ظرفیت گرمایی ویژه متوسط بین دو دما ($J\ kg^{-1}\ K^{-1}$)، $\dot{V}$ نرخ جریان حجمی هوای داغ مرطوب ($m^3\ s^{-1}$) و ρ_0 چگالی مخلوط هوای خشک و بخار آب ($kg\ m^{-3}$)، n تعداد نازل‌ها، d قطر نازل‌ها (m) و w سرعت تخلیه سیال از نازل‌ها ($m\ s^{-1}$) هستند. بر این اساس و با توجه به رطوبت موجود در هوای ورودی به گرم‌کن، المنت‌های مورد نیاز انتخاب و گرم‌کن طراحی و ساخته شد.



(a) (b)

شکل ۱- الف- طرح‌واره سامانه اعمال پیش‌تیمار جت برخوردی هوای داغ مرطوب (۱-مولد بخار، ۲-لوله‌های انتقال بخار، ۳- دمنده صنعتی کانال جانبی، ۴- شیر بستن، ۵- شیر بازکردن، ۶- کانال بازیافت هوا، ۷- گرم‌کن برقی هوا، ۸- کانال انتقال هوای داغ مرطوب، ۹- محفظه اعمال پیش‌تیمار، ۱۰- محفظه توزیع هوای داغ مرطوب و نازل‌ها، ۱۱- حسگر دما، ۱۲- حسگرهای دما و رطوبت و ۱۳- کنترل‌کننده دما) و ب- سامانه ساخته‌شده

Fig.1. a- Schematic view of high-humidity hot air impingement blanching pretreatment system (1- Steam generator, 2- Steam transfer pipes, 3- Side channel pump, 4- Closing valve, 5- Opening valve, 6- Air recycling channel, 7- Electric air heater, 8- High-humid hot air transfer channel, 9- Pretreatment chamber, 10- High-humid hot air distribution chamber and nozzles, 11- Temperature sensor, 12- Temperature and humidity sensors, and 13- Temperature controller), and b- Fabricated system



شکل ۲- جت برخوردی هوای داغ مرطوب با استفاده از آرایه نازل‌ها

Fig. 2. High-humidity hot air impingement using array of nozzles

ایجاد ضریب انتقال حرارت یکنواخت در این روش بستگی به طراحی صحیح سامانه جت برخوردی دارد. سه متغیر هندسی قطر هیدرولیکی نازل مدور D، فاصله نازل تا صفحه برخورد H و فاصله مرکز تا مرکز نازل‌ها L_T ابعادی هستند که باید در ارتباط مناسب با یکدیگر تعیین شوند. برای به‌دست آوردن مقدار بهینه یعنی یک مقدار ماکزیمم برای ضریب انتقال جرم و حرارت برای یک توان دمنده داده‌شده در واحد سطح انتقال حرارت یکی از طول‌ها ثابت در نظر گرفته شد و نسبت بهینه طولی دو بعد دیگر به طول در نظر گرفته شده محاسبه شد (Martin, 1977; Schabel & Martin, 2010). به دلایل ایمنی اغلب فاصله نازل تا صفحه برخورد عامل محدود کننده مسئله بهینه‌سازی می‌باشد (Schabel & Martin, 2010). به‌صورت تجربی محدوده‌هایی برای این فاصله در پژوهش‌های انجام‌شده توسط محققین گزارش شده است با در نظر گرفتن H برابر با ۸ برابر قطر نازل (Sarkar & Singh, 2004) مقادیر بهینه تقریبی قطر نازل‌ها و فاصله نازل‌ها از یکدیگر به‌ترتیب با استفاده از رابطه‌های (۳) و (۴) برای آرایه‌ای از نازل‌های دایره‌ای به‌دست آمد.

$$\mathrm{D}_{opt} \approx \frac{1}{5} H \tag{۳}$$

$$\mathrm{L}_{Topt} \approx \frac{7}{5} H \tag{۴}$$

به‌دلیل این‌که توزیع همگن سیال عامل در بازده و یکنواختی فرآیند بلانچینگ محصول مورد نظر تأثیر به‌سزایی دارد یکنواختی توزیع جریان هوای داغ مرطوب در بلانچر بسیار با اهمیت است. توزیع مناسب سیال عامل کاملاً به ساختار محفظه توزیع سامانه اعمال جت برخوردی وابسته است. در این رابطه با استفاده از نرم‌افزار کامسول به بررسی ساختارهای ساده و مناسب برای ایجاد یکنواختی در محفظه توزیع بخار و در نتیجه خروجی یکسان از نازل‌ها پرداخته شد. به‌منظور توزیع یکنواخت جریان هوا از یک مانع و همچنین یک صفحه مشبک در فاصله مناسب قبل از صفحه نازل‌ها استفاده شد. در شکل ۳ تصویری از ساختار مورد نظر مشاهده می‌شود.

دمنده مورد نیاز برای ایجاد جت برخوردی با توجه به توان محاسبه شده انتخاب شد. حداقل توان مورد نیاز دمنده در واحد سطح انتقال حرارت از رابطه‌های (۵) تا (۷) محاسبه شد.

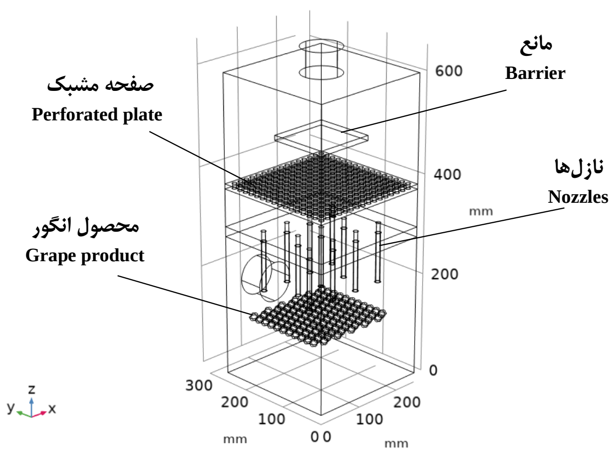
$$P = \frac{G \Delta P}{\rho} \tag{۵}$$

$$G = \frac{\dot{m}}{A} = \rho f C_D w \tag{۶}$$

$$\Delta p = \frac{\rho w^2}{2} \tag{۷}$$

که، P توان دمنده (W)، G نرخ جریان جرمی هوا بر واحد سطح انتقال حرارت ($\mathrm{kg\ m^2\ s^{-1}}$)، ΔP اختلاف فشار دمنده (Pa) و ρ ثابت چگالی هوا ($\mathrm{kg\ \ m^3}$) هستند. $\dot{m}$ نرخ جریان جرمی در واحد سطح انتقال حرارت ($\mathrm{kg\ \ s^{-1}}$)، A سطح انتقال حرارت ($\mathrm{m^2}$)، f نسبت سطح آزاد، C_D ضریب تخلیه و w سرعت هوای خروجی از نازل ($\mathrm{m\ s^{-1}}$) هستند.

برای انتخاب دمنده، افت فشار ایجادشده در سامانه با استفاده از نرم‌افزار کامسول برآورد شده و با توجه به سرعت سیال خروجی از نازل‌ها از یک دمنده صنعتی کانال جانبی گرینکو (GREENCO) مدل 2RB 710-7AA11 استفاده شد. جدول ۱ مدل، مشخصات فنی و کشور سازنده اجزای تشکیل‌دهنده سامانه اعمال پیش‌تیمار را نشان می‌دهد.



شکل ۳– نمای محفظه نازل‌ها شامل مانع، صفحه مشبک، صفحه نازل‌ها و محصول انگور

Fig.3. View of nozzles’ chamber including barrier, perforated plate, nozzles’ plate, and grape product

جدول ۱– مدل، مشخصات فنی، محدوده کاری و کشور سازنده اجزای تشکیل‌دهنده سامانه اعمال پیش‌تیمار

Table 1- Model, range of operation and technical specifications, and manufacturing country of the pretreatment application system of the components

اجزا Components	مدل Model	محدوده کاری و مشخصات فنی Range of operation and technical specs	کشور سازنده Manufacturing country
دمنده Blower	GREENCO Side Channel 2RB710-7AA11	توان ۲/۲ کیلووات حداکثر جریان ۳۷۶ مترمکعب بر ساعت حداکثر فشار ۲۰۰ میلی‌بار 2.2 kW Power Maximum flow of 376 m^3 h^{-1} Maximum pressure of 200 mbar	چین China
نازل‌ها Nozzles	نازل مدور Round nozzle	قطر ۱۴ میلی‌متر و طول ۱۲ سانتی‌متر Diameter of 14 mm and length of 12 cm	ایران Iran
حسگر دما Temperature sensor	ترموکوپل نوع K امگا Omega K type thermocouple	۰ تا ۳۷۰ درجه سلسیوس 0 to 370 °C	آمریکا USA
حسگر دما و رطوبت Temperature and humidity sensor	Hatol2015	محدوده دمای ۴۰- تا ۱۲۵ درجه سلسیوس محدوده رطوبت ۰ تا ۱۰۰ درصد Temperature range of -40 to 125 °C Humidity range of 0 to 100%	سویس - ایران Switzerland - Iran
کنترلر دما Temperature controller	AUTONICS TCN4S-24R	کنترلر PID با ورودی ترموکوپل و خروجیSSR و محدوده اندازه‌گیری ۱۵۰- تا ۹۹۹ درجه سلسیوس PID controller with thermocouple input and SSR output and measurement range of -150 to 999 °C	کره جنوبی South Korea
رله حالت جامد Solid state relay (SSR)	SSRFOTEK 50A	۵۰ آمپر 50A	تایوان Taiwan
مولد بخار Steam generator	مولد بخار گرم صنعتی Industrial steam generator	سه فاز و توان ۶ کیلووات Three phases and 6 kW power	ایران Iran
گرم‌کن Heater	المنت پره‌ای Finned element	المنت ۵۰۰ واتی 500 W Element	ایران Iran

بخش کنترل شامل حسگرها، دیتالاگر، اینورتر کنترل‌کننده سرعت و کنترل‌کننده PID دما می‌باشد. در این سامانه از ترموکوپل OMEGA و دیتالاگر دما و رطوبت HATOL برای پایش دما و رطوبت نسبی هوای خروجی از نازل‌ها استفاده شد. برای کنترل دما نیز از یک کنترل‌کننده PID و رله SSR استفاده شد. PID استفاده شده با کنترل المنت‌های گرم‌کن دمای هوای مرطوب خروجی از نازل‌ها را روی دمای تنظیمی حفظ می‌کند.

سرعت سیال خروجی از نازل‌ها با استفاه از یک سرعت‌سنج بادی سیم داغ مدل BENETECH GM8903 با پراب مجزا ساخت چین اندازه‌گیری شد. با تنظیم دور دمنده با یک دستگاه اینورتر سه فاز دلتا VFD075M43 سری M سرعت سیال خروجی از نازل‌ها در محدوده تعیین شده تنظیم شد.

با توجه به استفاده از هوای داغ با رطوبت نسبی بالا در پیش‌تیمار، از یک دستگاه بخارساز گرم صنعتی استفاده شد. با تنظیم شیرهای باز و بسته کردن بخار، رطوبت نسبی در محدوده مورد نظر تنظیم شد. اجزای جانبی سامانه نیز شامل مجاری انتقال سیال، تابلو برق و کابل‌های برق سه فاز مربوط به پمپ و بخارساز می‌باشند.

اعمال پیش‌تیمار و ارزیابی روند خشک شدن انگور تحت تأثیر پیش‌تیمار

آزمایش‌های ارزیابی سامانه به‌منظور مطالعه اثر دما و مدت اعمال پیش‌تیمار جت برخوردی هوای داغ مرطوب بر سینتیک خشک‌کردن انگور و رنگ کشمش تولیدشده پس از فرآیند خشک شدن در سه تکرار انجام شد. از تیمار شاهد و تیمار تیزاب نیز به‌منظور مقایسه روند

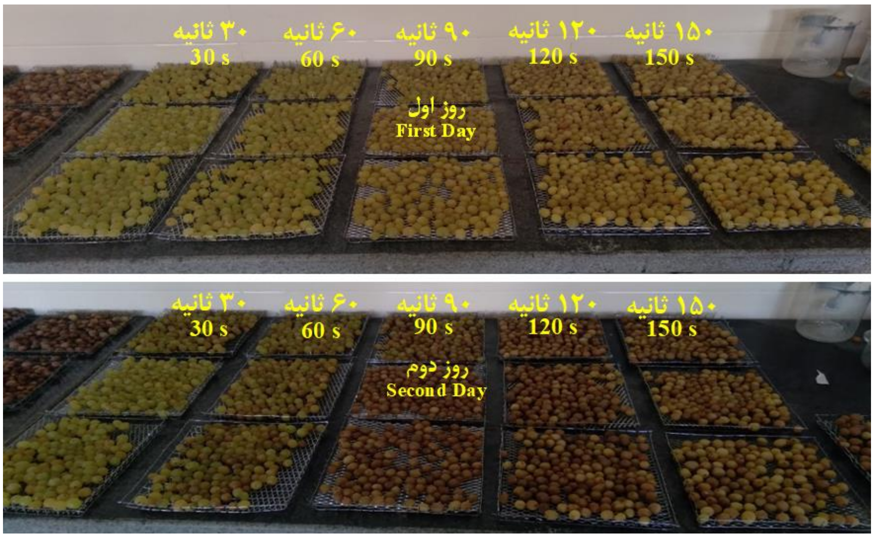
خشک شدن پیش‌تیمار جت هوای داغ مرطوب و پیش‌تیمار مرسوم استفاده شد. با توجه به کیفیت بالای کشمش سایه‌خشک، روند خشک شدن با وزن‌کردن روزانه هر یک از نمونه‌ها در سایه و در دمای محیط آزمایشگاه تا رسیدن رطوبت نمونه‌ها به حدود ۱۹ درصد بر پایه تر مورد مطالعه قرار گرفت.

نمونه‌های انگور از شهرستان ملایر و انگورهای یک باغ با رطوبت اولیه در حدود ۷۰ درصد بر پایه تر تهیه شدند. برای انجام آزمایش‌ها سعی شد که انگورهای هم‌اندازه با شرایط رسیدگی مشابه انتخاب شوند. به‌منظور اعمال پیش‌تیمار جت برخوردی هوای داغ مرطوب ۲۰۰ گرم انگور بی‌دانه سفید پس از جداسازی از خوشه در سینی‌های ساخته‌شده قرار داده شد. پکتین به‌عنوان مهم‌ترین پلی‌ساکارید دیواره سلولی نقش مهمی در استحکام و چسبندگی بافت محصولات کشاورزی ایفا می‌کند (Moelants *et al.*, 2014). تخریب و افزایش انحلال‌پذیری پکتین در اثر حرارت باعث افزایش نفوذپذیری دیواره سلولی نسبت به رطوبت می‌شود (Swati & Ashim, 2014). به علاوه، تخریب حرارتی پکتین اساساً ناشی از دماهای بالاتر از ۸۰ درجه سلسیوس در فرآیندهای حرارتی می‌باشد (De Roeck, Sila, Duvetter, Van Loey, & Hendrickx, 2008). بنابراین، با توجه به مطالب بیان‌شده و مطالعات صورت‌گرفته، هوای داغ مرطوب در دماهای ۹۰، ۱۰۰ و ۱۱۰ درجه سلسیوس، سرعت هوای ۱۰ متر بر ثانیه و رطوبت نسبی در محدوده ۴۵-۴۰ درصد به محصول اعمال شد. مدت‌های اعمال پیش‌تیمار نیز برابر با مقادیر ۳۰، ۶۰، ۹۰، ۱۲۰ و ۱۵۰ ثانیه در نظر گرفته شد (Deng *et al.*, 2018; Wang *et al.*, 2019)

اعمال محلول تیزاب به روش غوطه‌وری انجام شد. برای این کار ۲۰۰ گرم انگور به مدت ۹۰ ثانیه در محلول قرار داده شد. در روش غوطه‌وری محلول مورد نیاز برای تیزابی‌کردن ۱۰۰۰ کیلوگرم انگور شامل ۲ لیتر روغن سبزه، ۵ کیلوگرم کربنات پتاسیم و ۱۰۰ لیتر آب تمیز و بهداشتی می‌باشد (Doulati Baneh, 2016).

در شکل ۴ تصاویری از نمونه‌ها در روزهای اول و دوم بعد از اعمال پیش‌تیمار جت برخوردی هوای داغ مرطوب مشاهده می‌شود.

در شکل ۵ نیز تصاویری از کشمش‌های تولیدی مربوط به اعمال پیش‌تیمار در مدت‌های ۳۰، ۶۰، ۹۰، ۱۲۰ و ۱۵۰ ثانیه مشاهده می‌شود.



شکل ٤- تصویر نمونه‌ها در روزهای اول و دوم بعد از اعمال پیش‌تیمار جت برخوردی هوای داغ مرطوب

Fig.4. The image of the samples on the first and second days after applying high-humidity hot air impingement blanching pretreatment



شکل ۵- تصویر کشمش‌های تولیدی مربوط به اعمال پیش‌تیمار به‌ترتیب در مدت‌های ۳۰، ۶۰، ۹۰، ۱۲۰ و ۱۵۰ ثانیه

Fig.5. The image of the produced raisins related to durations of 30, 60, 90, 120, and 150 s of applying pretreatment, respectively

مطالعه تأثیر مدت اعمال پیش‌تیمار بر سینتیک خشک کردن انگور با رسم نمودارهای مقادیر نسبت رطوبت و نرخ خشک کردن با زمان و اندازه‌گیری ضریب نفوذ انجام شد. نسبت رطوبت[1] انگور (MR) از رابطه (۸) محاسبه شد (Thorat, Mohapatra, Sutar, Kapdi, & Jagtap, 2012).

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_o - M_e} \quad (۸)$$

که، M_t محتوای رطوبت نمونه‌های انگور در هر زمان از خشک کردن ($kg_{H2O}\ kg^{-1}_{dry\ matter}$)، M_0 محتوای رطوبت اولیه ($kg_{H2O}\ kg^{-1}_{dry\ matter}$) و M_e محتوای رطوبت تعادلی ($kg_{H2O}\ kg^{-1}_{dry\ matter}$) هستند.

نرخ خشک کردن نمونه‌های انگور طی خشک کردن نیز با استفاده از رابطه (۹) محاسبه شد.

$$DR = \frac{M_{t_1} - M_{t_2}}{t_2 - t_1} \quad (۹)$$

که، t_1 و t_2 مدت خشک شدن طی فرآیند خشک کردن (h) و M_{t1} و M_{t2} محتوای رطوبت نمونه‌های انگور در زمان‌های t_1 و t_2 ($kg_{H2O}\ kg^{-1}_{dry\ matter}$) می‌باشند.

انتقال رطوبت طی خشک کردن عمدتاً با نفوذ داخلی کنترل می‌شود. قانون دوم فیک مربوط به نفوذ (رابطه ۱۰) به‌طور گسترده برای توصیف فرآیند خشک کردن در محدوده نرخ نزولی رطوبت برای محصولات کشاورزی استفاده می‌شود.

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D_{eff} \nabla^2 M \quad (۱۰)$$

معادله نفوذ برای مختصات کروی با در نظر گرفتن فرضیاتی حل شده است (Crank, 1979) و برای زمان‌های طولانی خشک کردن به‌صورت معادله لگاریتمی (۱۱) بیان می‌شود (Ah-Hen, Zambra, Aguëro, Vega-Gálvez, & Lemus-Mondaca, 2013).

$$\text{Ln}\, MR = Ln\left(\frac{6}{\pi^2}\right) - \left(\frac{\pi^2 D_{eff}}{r^2}\right)t \quad (۱۱)$$

که، D_{eff} ضریب نفوذ مؤثر رطوبت ($m^2\ s^{-1}$)، r شعاع معادل حجم نمونه‌های انگور (m) و t زمان خشک کردن (s) هستند. از رابطه (۱۱) با ترسیم نمودار LnMR در برابر زمان یک خط مستقیم با شیب k به‌دست آمد که با استفاده از رابطه (۱۲) (مربوط به شیب خط ضریب نفوذ تعیین شد (Bai *et al.*, 2013).

$$k = \frac{\pi^2 D_{eff}}{r^2} \quad (۱۲)$$

برای تعیین ابعاد انگور به‌منظور محاسبه ضریب نفوذ، میانگین قطر طولی و قطر عرضی ۳۰ عدد حبه با استفاده از یک کولیس با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر به‌ترتیب برابر با ۰/۰۱۵۳۲ و ۰/۰۱۳۳۸ متر اندازه‌گیری شد. سپس قطر معادل حجمی از رابطه (۱۳) برابر با ۰/۰۱۴ متر محاسبه شد (Wang *et al.*, 2017b).

$$d = \sqrt[3]{d_x * d_y * d_z} \quad (۱۳)$$

که، d_z قطر طولی (m) و d_x و d_y قطرها در راستای جانبی (m) می‌باشند.

ارزیابی رنگ کشمش‌های تولیدی

تأثیر پیش‌تیمار جت برخوردی هوای داغ مرطوب بر مشخصات رنگی کشمش‌های تولیدی در فضای رنگی (Lab) مورد مطالعه قرار گرفت. مقادیر L^*، a^* و b^* با تهیه تصاویر رنگی از کشمش‌ها و انگور و با استفاده از نرم اندازه‌گیری شد. به این منظور با تبدیل فضای رنگی تصاویر به فضای $L^*a^*b^*$ برای هر یک از کانال‌های جداشده مقادیر میانگین پیکسل‌های تصاویر محاسبه شد. مقدار هر شاخص رنگی، میانگین ۵ بار اندازه‌گیری بود. سپس، مقادیر کروما (C)، زاویه هیو H° و اختلاف رنگ کل (ΔE) نیز با استفاده از روابط (۱۴)، (۱۵) و (۱۶) محاسبه شدند. کروما نشان‌دهنده مقدار اشباع رنگ می‌باشد و زاویه هیو پارامتری برای تشخیص رنگ محصولات کشاورزی با شاخص‌های زاویه 0° برای رنگ قرمز، 60° برای رنگ زرد، 120° برای رنگ قرمز و 240° برای رنگ آبی می‌باشد. اختلاف رنگ کل ΔE نیز پارامتری است که برای ارزیابی اختلاف رنگ کل بین نمونه خشک‌شده و تازه استفاده می‌شود. شاخص‌های رنگی انگور تازه (L_0^*، a_0^* و b_0^*) به‌عنوان مرجع در نظر گرفته می‌شود و مقادیر کمتر ΔE بیانگر تغییر رنگ کمتر نمونه پس از خشک‌شدن نسبت به نمونه تازه است. داده‌های به‌دست‌آمده با استفاده نرم‌افزار SPSS مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. مقایسه میانگین‌ها با آزمون دانکن در سطح ۰/۰۵ انجام شد.

$$C = \sqrt{(a^*)^2 + (b^*)^2} \quad (۱۴)$$

$$H^\circ = \tan\left(\frac{b^*}{a^*}\right) \quad (۱۵)$$

$$\Delta E = \sqrt{(L_0^* - L^*)^2 + (a_0^* - a^*)^2 + (b_0^* - b^*)^2} \quad (۱۶)$$

آنالیز آماری

در این پژوهش، به‌منظور مطالعه تأثیر دما و مدت اعمال پیش‌تیمار جت برخوردی هوای داغ مرطوب بر مدت خشک‌شدن و شاخص‌های رنگی کشمش تولیدی، آنالیز واریانس داده‌ها در قالب طرح آزمایشی فاکتوریل با طرح پایه کاملاً تصادفی با سه تکرار انجام شد. داده‌های به‌دست آمده با استفاده از نرم‌افزار SPSS تجزیه و تحلیل شدند. مقایسه میانگین داده‌های مدت خشک‌شدن با آزمون

1- Moisture ratio

دانکن در سطح ۱ درصد و مقایسه میانگین داده‌های شاخص‌های رنگی کشمش تولیدی با آزمون دانکن در سطح ۵ درصد انجام شد.

نتایج و بحث

نتایج آنالیز واریانس تأثیر دما و مدت اعمال پیش‌تیمار بر مدت خشک‌شدن انگور در جدول ۲ آورده شده است. مطابق نتایج، دما و مدت اعمال پیش‌تیمار تأثیر بسیار معنی‌داری بر مدت خشک‌شدن در سطح ۱ درصد داشتند، لیکن اثر متقابل دما و مدت اعمال پیش‌تیمار نیز بر مدت خشک‌شدن معنی‌دار نبود.

جدول ۲ - تجزیه واریانس مدت خشک‌شدن انگور تحت تأثیر دما و مدت اعمال پیش‌تیمار

Table 2- Analysis of variance of grape drying duration affected by pretreatment temperature and duration

منابع تغییر Sources of variation	درجه آزادی Degree of freedom	میانگین مربعات Mean square
دما Temperature (°C)	2	41.867**
مدت پیش‌تیمار (ثانیه) Pretreatment duration (s)	4	128.633**
دما × مدت پیش‌تیمار Temperature × Pretreatment duration	8	0.783 ns
خطا Error	30	2.356

** اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد، ns عدم اختلاف معنی‌دار

**Significant difference in 1% probability level, ns No significant difference

جدول ۳ نتایج مقایسه میانگین اثر دمای پیش‌تیمار بر مدت خشک‌شدن انگور را نشان می‌دهد. مطابق انتظار با افزایش دما، مدت خشک شدن کاهش یافته است. هرچند که اختلاف معنی‌داری در این کاهش بین سطوح دمایی ۱۰۰ و ۱۱۰ درجه سلسیوس مشاهده نشد و تنها بین دمای ۹۰ درجه سلسیوس و سطوح دمایی ذکر شده اختلاف معنی‌داری وجود داشت. از مقایسه میانگین اثر مدت اعمال پیش‌تیمار بر مدت خشک‌شدن (جدول ۴) نیز مشاهده شد که بیشترین تأثیر معنی‌دار افزایش مدت اعمال پیش‌تیمار بر کاهش مدت خشک‌شدن مربوط به مدت اعمال ۱۵۰ ثانیه بود که اختلاف معنی‌داری با سایر سطوح مدت اعمال پیش‌تیمار داشت.

جدول ۳- مقایسه میانگین مدت خشک شدن انگور تحت تأثیر دمای پیش‌تیمار

Table 3- Comparison of drying duration mean affected by pretreatment temperature

دما Temperature (°C)	مدت خشک‌شدن (روز) Drying duration (day)
90	30.60a
100	28.73b
110	27.27b

مقادیر دارای حروف کوچک انگلیسی مشابه دارای اختلاف معنی‌دار در سطح ۱٪ براساس آزمون دانکن نیستند.

Values followed by the common lower case letter do not differ statistically at 1% probability level.

جدول ٤- مقایسه میانگین مدت خشک شدن انگور تحت تأثیر مدت اعمال پیش‌تیمار

Table 4- Comparison of drying duration mean affected by pretreatment duration

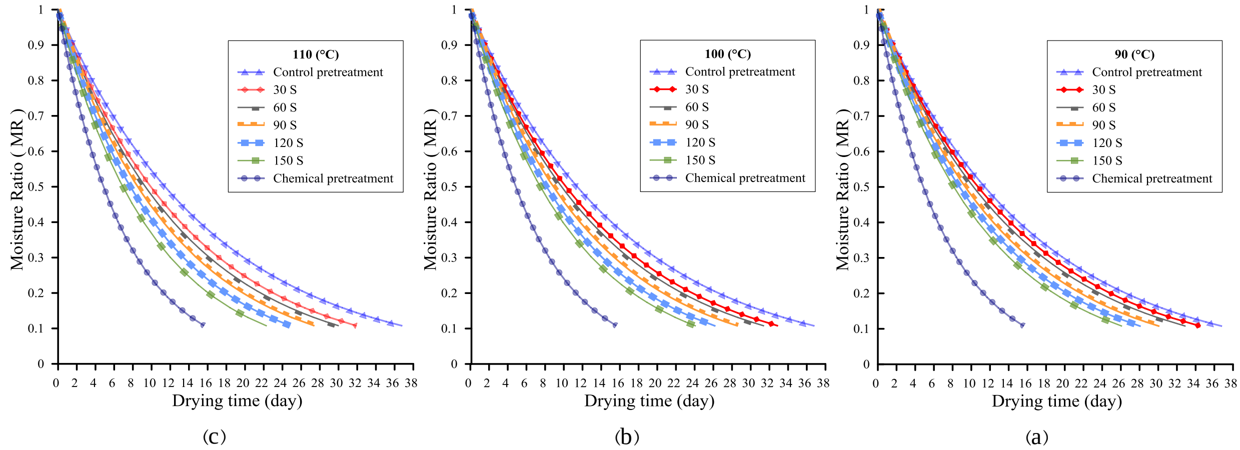
مدت اعمال پیش‌تیمار (ثانیه) Pretreatment duration (s)	مدت خشک‌شدن (روز) Drying duration (day)
30	33.22a
60	31.89a
90	28.67b
120	26.56c
150	24d

مقادیر دارای حروف کوچک انگلیسی مشابه دارای اختلاف معنی‌دار در سطح ۱٪ براساس آزمون دانکن نیستند.

Values followed by the common lower case letter do not differ statistically at 1% probability level.

برای مقایسه تأثیر مدت و دمای پیش‌تیمار جت برخوردی هـوای داغ مرطوب بر روند خشک کردن انگور، نمودارهای نسبت رطوبت در برابر زمان خشک شـدن در شـکل‌هـای ۶ و ۷ نشـان داده شـده‌انـد. همان‌طور که از نمودارها مشخص است رونـد کلـی کـاهش رطوبـت متأثر از دما و مدت اعمال پیش‌تیمار جت برخوردی هوای داغ مرطوب است. مطابق شکل ۶ مدت لازم برای کاهش رطوبت به مقـدار مـورد نظـر در مـدت‌هـای تـأثیر ۳۰، ۶۰، ۹۰، ۱۲۰ و ۱۵۰ ثانیـه از اعمـال پیش‌تیمار جت برخوردی به‌ترتیب برابر بـا ۳۵، ۳۳، ۳۰، ۲۸ و ۲۶ روز بـرای دمـای ۹۰ درجـه سلسـیوس، ۳۳، ۳۱، ۲۹، ۲۶ و ۲۴ روز بـرای دمای ۱۰۰ درجه سلسیوس و ۳۲، ۳۰، ۲۷، ۲۵ و ۲۲ روز برای دمـای ۱۱۰ درجه سلسیوس تعیین شد. بنـابراین، بـا افـزایش مـدت اعمـال پیش‌تیمار از ۳۰ به ۱۵۰ ثانیه، مدت خشک کردن به‌ترتیـب در حـدود ۳۰، ۳۷ و ۴۵ درصد کاهش پیدا می‌کند.

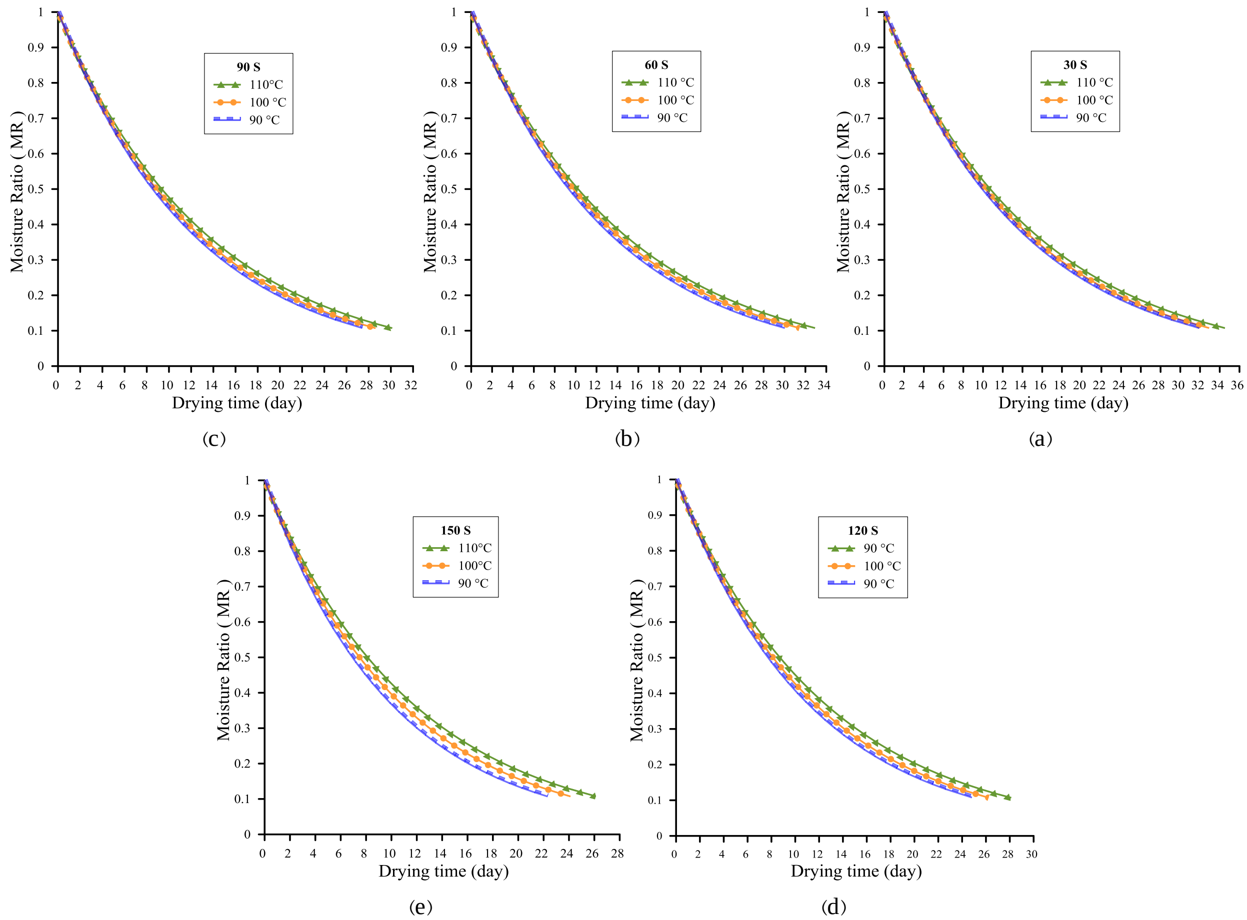
بررسی نمودارهای شکل ۶ و مقایسـه رونـد خشـک شـدن بـین پیش‌تیمارهای شاهد، شیمیایی و جت برخـوردی هـوای داغ مرطـوب نشان‌دهنده مؤثر بودن جت برخوردی هوای داغ مرطـوب بـر سـرعت خشک کردن انگور می‌باشد. در مقایسه با انگور تـازه مقـدار افـزایش سرعت خشک کردن تحت تأثیر جت برخوردی هوای داغ مرطـوب از ۸ درصد برای شرایط ۳۰ ثانیه در دمـای ۹۰ درجـه سلسـیوس تـا ۶۸ درصد برای حالت ۱۵۰ ثانیـه در دمـای ۱۱۰ درجـه سلسـیوس تغییـر می‌کند. به‌طور کلی این افزایش نرخ خشک شـدن حاصـل از اعمـال پیش تیمار جت برخوردی هوای داغ مرطوب را می‌توان ناشی از تأثیر ایـن پـیش‌تیمـار بـر بافـت و تخریـب دیـواره سـلول‌هـا و همچنـین میکروترک‌های ایجاد شد بر پوست حبه‌های انگور دانست. این نتـایج مشابه با یافته‌های پژوهش‌های قبلی توسط دنگ و همکاران (Deng *et al.*, 2018) برای هویج، لـی یـو (Liu *et al.*, 2019) و همکـاران برای گل کلم بروکلی و وانـگ و همکـاران (Wang *et al.*, 2017a) برای محصول فلفل قرمز تحت تاثیر پیش‌تیمار جت برخوردی هـوای داغ مرطوب می‌باشد.



شکل ٦– تغییر نسبت رطوبت با زمان برای پیش‌تیمارهای شاهد، شیمیایی و جت برخوردی هوای داغ مرطوب به مدت‌های ۳۰، ۶۰، ۹۰، ۱۲۰ و ۱۵۰ ثانیه و دماهای ۹۰، ۱۰۰ و ۱۱۰ درجه سلسیوس

Fig.6. Variation in moisture ratio with time for pretreatments of control, chemical, and high-humidity hot air impingement blanching at durations of 30, 60, 90, 120, and 150 s and temperatures of a) 90°C, b) 100°C, and c) 110°C

شکل ۷ نشان می‌دهد که نمودارهای سینتیک خشک کردن برای هـر سـه دمـای ۹۰، ۱۰۰ و ۱۱۰ درجـه سلسـیوس در هـر یـک از مدت‌های اعمال پیش‌تیمار تقریباً بر یکدیگر منطبق هستند. با بررسی نمودار مربوط به مدت ۱۵۰ ثانیه اعمال پیش‌تیمار مشاهده می‌شود که با تغییر دما از ۹۰ به ۱۱۰ درجه سلسیوس، ثابت سرعت خشک شـدن در حدود ۱۷ درصد افزایش پیدا می‌کند. یافته‌هـای حاصـل از بررسـی نمودارهای سینتیک خشک‌کردن بیانگر آن اسـت کـه در بـین دمـا و مدت اعمال پیش‌تیمار جت برخوردی هوای داغ مرطوب، مدت اعمال پیش‌تیمار عامل مؤثرتری بر افزایش سرعت خشک شـدن مـی‌باشـد. بنابراین، مدت اعمال پیش‌تیمار پارامتر مهمـی اسـت کـه بایـد بـرای نتیجه مطلوب‌تر به‌خوبی کنترل شود.

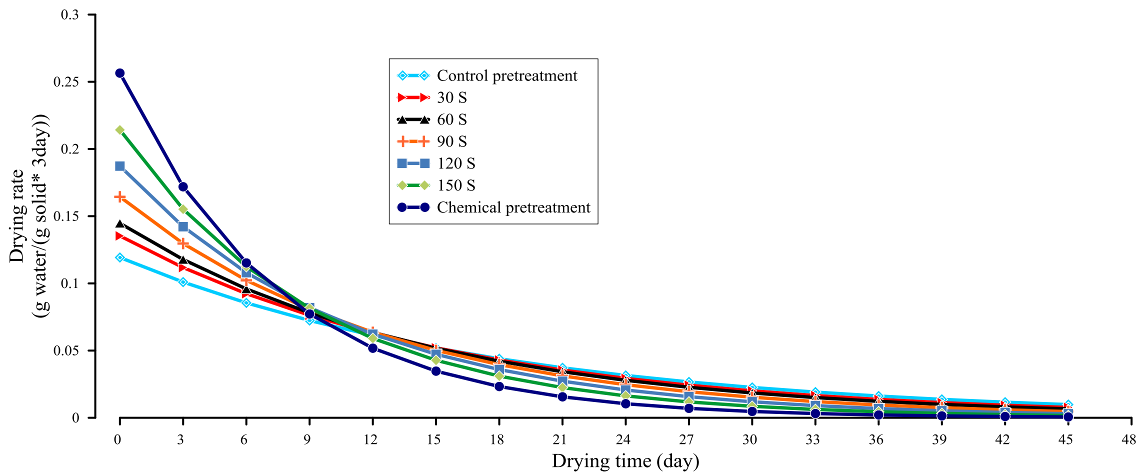


شکل ۷– تغییر نسبت رطوبت با زمان برای پیش‌تیمار جت برخوردی هوای داغ مرطوب در دماهای ۹۰، ۱۰۰ و ۱۱۰ درجه سلسیوس و مدت‌های ۳۰، ۶۰، ۹۰، ۱۲۰ و ۱۵۰ ثانیه

Fig.7. Variation in moisture ratio with time for high-humidity hot air impingement blanching pretreatment at temperatures of 90, 100, and 110 °C and durations of a) 30 s, b) 60 s, c) 90 s, d) 120 s, and e) 150 s

در شکل ۸ نمودارهای نرخ خشک شدن در برابر زمان برای پیش‌تیمارهای شاهد، شیمیایی و جت برخوردی هوای داغ مرطوب در دمای ۱۱۰ درجه سلسیوس و مدت‌های ۳۰، ۶۰، ۹۰، ۱۲۰ و ۱۵۰ ثانیه نشان داده شده است. نمودارها بیانگر کاهش نرخ خشک شدن متناسب با زمان هستند. همچنین، همان‌طور که مشخص است نرخ از دست دادن رطوبت در ابتدای زمان خشک شدن سریع‌تر می‌باشد. در ابتدای خشک شدن مقاومت به از دست دادن رطوبت کمتر است و رطوبتی که پیوندهای سست دارند راحت‌تر جدا می‌شود با کاهش محتوای رطوبت با ادامه خشک شدن، رطوبت باقی‌مانده بیشتر و قوی‌تر محدود شده و با کاهش انتقال آب از داخل به سطح محصول سرعت خشک شدن تحت تأثیر قرار می‌گیرد (Earle, 2013).

مقادیر ضریب نفوذ انگور برای پیش‌تیمارهای شاهد، شیمیایی و جت برخوردی هوای داغ مرطوب در مدت‌های مختلف برای شرایط دمایی ۹۰، ۱۰۰ و ۱۱۰ درجه سلسیوس در جداول ۵ تا ۷ ارایه شده است. مقادیر این ضریب از ۲/۲۸×۱۰$^{-۱۰}$ مترمربع بر ثانیه برای ۳۰ ثانیه اعمال پیش‌تیمار در دمای ۹۰ درجه سلسیوس تا ۳/۵۳×۱۰$^{-۱۰}$ مترمربع بر ثانیه برای ۱۵۰ ثانیه اعمال پیش‌تیمار در دمای ۱۱۰ درجه سلسیوس تغییر می‌کند. همچنین بیشترین مقدار ضریب نفوذ (۷/۴۶×۱۰$^{-۱۰}$ مترمربع بر ثانیه) مربوط به پیش‌تیمار شیمیایی بود که در محدوده کلی ۱۰$^{-۹}$ تا ۱۰$^{-۱۰}$ مترمربع بر ثانیه برای ضریب نفوذ مواد غذایی قرار دارند (Madamba, Driscoll, & Buckle, 1996). اعمال پیش‌تیمار جت برخوردی هوای داغ مرطوب با خارج کردن هوا از بافت انگور و نرم کردن آن مقاومت به انتقال رطوبت از غشاء و دیواره سلول را کاهش می‌دهد (Dai *et al.*, 2020).



شکل ۸- تغییر نرخ خشک شدن با زمان برای تیمار شاهد، پیش‌تیمار شیمیایی و همچنین پیش‌تیمار جت برخوردی هوای داغ مرطوب در دمای ۱۱۰ درجه سلسیوس و مدت‌های ۳۰، ۶۰، ۹۰، ۱۲۰ و ۱۵۰ ثانیه

Fig. 8. Variation in drying rate with time for control treatment, chemical pretreatment, and high-humidity hot air impingement blanching pretreatment at temperature of 110 °C and durations of 30, 60, 90, 120, and 150 s

بنابراین، همان‌طور که مشخص است مقدار ضریب نفوذ با افزایش دما و مدت تأثیر پیش‌تیمار جت برخوردی هوای داغ مرطوب افزایش پیدا کرده است. همان‌طور که قبلا اشاره شد پیش‌تیمار شیمیایی با حل کردن لایه مومی پوست مقاومت به انتشار آب از آن را کاهش می‌دهد و از این رو تأثیر به‌سزایی بر افزایش ضریب نفوذ و نرخ خشک‌شدن دارد. ایوبی و همکاران (Ayoubi, Sedaghat, & Kashaninejad, 2015) با بررسی اثر پیش‌تیمارهای شیمیایی و آب داغ بر نرخ خشک‌کردن مقادیر ضریب نفوذ را در محدوده $۴/۶۲×۱۰^{-۱۰}$ تا $۸/۶۵×۱۰^{-۱۰}$ مترمربع بر ثانیه به‌دست آوردند که بیشترین مقدار مربوط به پیش‌تیمار شیمیایی بود. ژیائو و همکاران (Xiao *et al.*, 2010) نیز با بررسی روند خشک‌کردن انگور بی‌دانه موناکا تحت تأثیر دماها و سرعت‌های مختلف جریان هوا در یک خشک‌کن جت برخوردی مقادیر ضریب نفوذ را در محدوده $۱/۸۲×۱۰^{-۱۰}$ تا $۵/۸۴×۱۰^{-۱۰}$ متر مربع بر ثانیه تعیین کردند که مشابه با محدوده به‌دست‌آمده ضریب نفوذ در تحقیق حاضر می‌باشد. نوع پیش‌تیمار، رقم انگور و همچنین روش خشک‌کردن اثر معنی‌داری بر مقدار ضریب نفوذ و در نتیجه نرخ خشک‌شدن دارند که از این نظر محدوده‌های متفاوت ضریب نفوذ را می‌توان مورد توجه قرار داد.

جدول ۵- مقادیر ضریب نفوذ انگور برای پیش‌تیمارهای شاهد، شیمیایی و جت برخوردی هوای داغ مرطوب در مدت‌های مختلف و دمای ۱۱۰درجه سلسیوس

Table 5- Values of grape diffusion coefficient for control, chemical and high-humidity hot air impingement blanching pretreatments at different durations and temperature of 110 °C

مدت اعمال پیش‌تیمار (ثانیه) **Pretreatment duration (s)**	معادله **Equation**	ضریب تعیین **R^2**	ضریب نفوذ ($۱۰^{-۱۰}$× مترمربع بر ثانیه) **Diffusion Coefficient ($\times10^{-10}$ m^2 s^{-1})**
تیمار شاهد Control treatment	$\text{Ln}MR=-4.41\times10^{-5}t+0.0824$	0.9858	2.19
30	$\text{Ln}MR=-4.95\times10^{-5}t+0.0432$	0.9955	2.46
60	$\text{Ln}MR=-5.09\times10^{-5}t-0.0063$	0.9985	2.53
90	$\text{Ln}MR=-5.67\times10^{-5}t-0.0527$	0.9982	2.82
120	$\text{Ln}MR=-6.23\times10^{-5}t-0.1145$	0.9899	3.10
150	$\text{Ln}MR=-7.11\times10^{-5}\text{t}-0.1537$	0.9808	3.53
پیش‌تیمار شیمیایی Chemical pretreatment	$\text{Ln}MR=-15.01\times10^{-5}\text{t}+0.0201$	0.9939	7.46

جدول ٦– مقادیر ضریب نفوذ انگور برای پیش‌تیمار جت برخوردی هوای داغ مرطوب در مدت‌های مختلف و دمای ۱۰۰درجه سلسیوس

Table 6- Values of grape diffusion coefficient for high-humidity hot air impingement blanching pretreatment at different durations and temperature of 100 °C

مدت اعمال پیش‌تیمار (ثانیه) Pretreatment duration (s)	معادله Equation	ضریب تعیین R^2	ضریب نفوذ (۱۰^-۱۰× مترمربع بر ثانیه) Diffusion Coefficient ($\times10^{-10}$ m^2 s^{-1})
30	Ln*MR*=-4.79×10-5*t*+0.0365	0.9962	2.38
60	Ln*MR*=-4.83×10-5*t*+0.0042	0.9978	2.40
90	Ln*MR*=-5.32×10-5*t*-0.0447	0.9974	2.64
120	Ln*MR*=-5.79×10-5*t*-0.0973	0.9938	2.88
150	Ln*MR*=-6.47×10-5*t*-0.1419	0.9833	3.22

جدول ۷– مقادیر ضریب نفوذ انگور برای پیش‌تیمار و جت برخوردی هوای داغ مرطوب در مدت‌های مختلف و دمای ۹۰ درجه سلسیوس

Table 7- Values of grape diffusion coefficient for high-humidity hot air impingement blanching pretreatment at different durations and temperature of 90 °C

مدت اعمال پیش‌تیمار (ثانیه) Pretreatment duration (s)	معادله Equation	R^2	ضریب نفوذ (۱۰^-۱۰× مترمربع بر ثانیه) Diffusion Coefficient ($\times10^{-10}$ m^2 s^{-1})
30	Ln*MR*=-4.58×10-5*t*+0.0432	0.9953	2.28
60	Ln*MR*=-4.71×10-5*t*+0.0268	0.9960	2.34
90	Ln*MR*=-5.16×10-5*t*-0.0071	0.9964	2.56
120	Ln*MR*=-5.41×10-5*t*-0.0655	0.9963	2.69
150	Ln*MR*=-5.74×10-5*t*-0.1402	0.9884	2.85

نتایج تجزیه واریانس شاخص‌های رنگی کشمش تولیدشده (L^*، C، H° و ΔE) تحت تأثیر دما و مدت اعمال پیش‌تیمار در جدول ۸ ارائه شده است. مشاهده می‌شود که هر دو متغیر دما و مدت اعمال پیش‌تیمار تأثیر معنی‌داری بر پارامترهای رنگی L^*، C، H° و ΔE در سطح ۵ درصد داشتند. همچنین اثرهای متقابل دما و مدت اعمال پیش‌تیمار بر پارامترهای رنگی مذکور در سطح ۵ درصد معنی‌دار بود.

جدول ۸ – تجزیه واریانس شاخص‌های رنگی کشمش تولیدی تحت تأثیر دما و مدت اعمال پیش‌تیمار

Table 8- Analysis of variance of color indices of raisins affected by pretreatment temperature and duration

منابع تغییر Sources of variation	درجه آزادی Degree of freedom	میانگین مربعات Mean square			
		C	*L**	H (°)	Δ*E*
دما Temperature (°C)	2	817.886*	523.138*	113.375*	142.608*
مدت پیش‌تیمار Pretreatment duration (s)	4	82.529*	13.591*	22.189*	16.173*
دما × مدت پیش‌تیمار Temperature × Pretreatment duration	8	181.999*	7.248*	15.949*	2.611*
خطا Error	60	0.332	0.331	0.974	0.188

* اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد

*Significant difference in 5% probability level

C، L^*، H و ΔE به ترتیب کروما، روشنایی، زاویه هیو و اختلاف رنگ کل هستند.

C, L^*, H, and ΔE are chroma, lightness, hue angle, and total color difference, respectively.

مقادیر میانگین پارامترهای رنگی L^*، C، H° و ΔE کشمش‌های تولیدی تحت تأثیر شرایط مختلف پیش‌تیمار جت برخوردی هوای داغ مرطوب در جدول ۹ نشان داده شده است. به‌طور کلی، کشمش‌های با رنگ روشن‌تر، وضوح بهتر، قرمزی کمتر و داشتن رنگی متمایل به زرد مطلوب می‌باشند (Dehbooreh & Esmaiili, 2009). همان‌طور که از جدول ۹ مشخص است، پارامتر L^* کشمش‌ها به‌عنوان شاخصی از روشنایی با افزایش زمان اعمال پیش‌تیمار در دماهای بالاتر به‌صورت معنی‌داری افزایش پیدا کرده است، به طوری‌که بیشترین مقدار این شاخص (۴۷/۴۱) مربوط به ۱۵۰ ثانیه اعمال پیش‌تیمار در دمای ۱۱۰ درجه سلسیوس بود. پارامتر کروما (C) به‌عنوان شاخصی از وضوح مطرح است و محصول با شاخص C بالاتر، واضح‌تر به نظر می‌رسد. شاخص C در دماهای ۱۰۰ و ۱۱۰ درجه سلسیوس با افزایش

مدت اعمال پیش‌تیمار به‌طور معنی‌داری افزایش پیدا کرده است و بیشترین مقدار این پارامتر (۲۸/۱۴) طی ۹۰ ثانیه اعمال پیش‌تیمار در دمای ۱۱۰ درجه سلسیوس به‌دست آمد. مقادیر بیشتر زاویه هیو به‌عنوان شاخصی از رنگ بیانگر کاهش قرمزی و افزایش تمایل به زردی در کشمش‌های تولیدی است. براساس نتایج، در دماهای ۹۰ و ۱۰۰ درجه سلسیوس با افزایش مدت اعمال پیش‌تیمار اختلاف معنی‌داری در مقادیر زاویه هیو مشاهده نشد. به هر جهت، نتایج بیانگر مقادیر بیشتر زاویه هیو در دمای ۱۱۰ درجه سلسیوس می‌باشد، به طوری‌که بیشترین زاویه (°۵۱/۱۷) مربوط به ۱۵۰ ثانیه اعمال‌پیش‌تیمار در دمای ۱۱۰ درجه سلسیوس بود. با توجه به جدول ۹ افزایش مدت اعمال پیش‌تیمار در هر یک از دماها اثر معنی‌داری بر کاهش ΔE نداشت. اما در یک مدت اعمال پیش‌تیمار ثابت، افزایش دما اثر معنی‌داری بر کاهش پارامتر نشان داد. به علاوه، کمترین مقدار شاخص ΔE (۲۱/۷۱) مربوط به ۱۵۰ ثانیه اعمال پیش‌تیمار در دمای ۱۱۰ درجه سلسیوس بود. به‌طور کلی براساس آنالیز رنگ انجام‌شده شاخص‌های رنگ کشمش‌های تولیدی با افزایش دما و مدت اعمال پیش‌تیمار بهبود پیدا کرد، به‌طوری‌که می‌توان دمای ۱۱۰ درجه سلسیوس و محدوده مدت ۱۵۰-۹۰ ثانیه را به‌عنوان شرایط مناسب اعمال پیش‌تیمار در نظر گرفت.

جدول ۹- پارامترهای رنگی L^*، C، H° و ΔE کشمش‌های تولیدی تحت تأثیر شرایط مختلف پیش‌تیمار جت برخوردی هوای داغ مرطوب

Table 9- Color parameters L^*, C, H° and ΔE of produced raisins under influence of different conditions of high-humidity hot air impingement blanching pretreatment

دما Temperature (°C)	مدت (ثانیه) Duration (s)	L^*	C	H (°)	ΔE
-	-	48.48a**	35.02a	86.64a	0a
90	30	32.32h	17.15h	44.99efg	29.74i
90	60	34.20fg	16.56hi	44.28fg	29.10gh
90	90	34.25fg	16.84hi	45.93de	28.60fg
90	120	35.14ef	17.29h	43.76ghi	28.55fg
90	150	35.49de	16.85hi	43.96gh	28.47f
100	30	33.30gh	16.13i	46.01de	29.30hi
100	60	34.37fg	17.05h	42.65hi	29.26hi
100	90	35.19def	18.20g	40.78j	29.09gh
100	120	35.87de	19.27f	42.37di	28.11f
100	150	36.30d	19.87f	45.87de	26.74e
110	30	35.75de	23.24e	46.76cd	26.07d
110	60	36.08de	24.71d	48.07c	25.25c
110	90	38.89c	28.14b	45.55def	24.90c
110	120	38.10c	25.31cd	46.63d	24.84c
110	150	41.47b	25.50c	51.17b	21.71b

مقادیر دارای حروف کوچک انگلیسی مشابه در ستون‌ها دارای اختلاف معنی‌دار در سطح ۵٪ بر اساس آزمون دانکن نیستند.

Values followed by the common lower case letter in the columns do not differ statistically at 5% probability level.

** مقادیر این سطر مربوط به انگور تازه هستند.

** Values of this row are for fresh grapes

نتیجه‌گیری

در این پژوهش تأثیر دما و مدت‌های مختلف اعمال پیش‌تیمار جت برخوردی هوای داغ مرطوب بر روند خشک شدن انگور به روش سایه خشک مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج سینتیک خشک کردن نشان داد که با افزایش دما و مدت اعمال پیش‌تیمار، سرعت خشک کردن افزایش پیدا می‌کند و مدت به‌کارگیری پارامتر مهم‌تری در کاهش مدت خشک کردن می‌باشد. بیشترین افزایش در سرعت خشک کردن مربوط به مدت ۱۵۰ ثانیه اعمال پیش‌تیمار در دمای ۱۱۰ درجه سلسیوس با افزایش ۶۸ درصد نسبت به انگور شاهد بود. با محاسبه مقادیر ضریب نفوذ برای حالت‌های مختلف اعمال پیش‌تیمار مشاهده شد که با افزایش دما و مدت اعمال پیش‌تیمار مقدار این ضریب افزایش پیدا می‌کند. با توجه به نتایج، این افزایش در پارامترهای مربوط به سرعت خشک کردن را می‌توان ناشی از میکروترک‌های ایجاد شده در پوست و افزایش نفوذپذیری دیواره سلول‌های انگور تحت تأثیر پیش‌تیمار دانست. همچنین یافته‌ها نشان داد که اعمال پیش‌تیمار می‌تواند خصوصیات رنگی کشمش تولیدی را بهبود ببخشد. غیر شیمیایی بودن، سرعت بالای اعمال پیش‌تیمار، حجم کم بخار استفاده شده، افزایش نرخ خشک کردن زمینه را برای استفاده از جت برخوردی هوای داغ مرطوب در مقیاس‌های بزرگ‌تر و صنعتی فراهم می‌کند.

References

1. Ah-Hen, K., Zambra, C. E., Aguëro, J. E., Vega-Gálvez, A., & Lemus-Mondaca, R. (2013). Moisture diffusivity coefficient and convective drying modelling of murta (Ugni molinae Turcz): Influence of temperature and vacuum on drying kinetics. *Food and Bioprocess Technology*, *6*(4), 919-930. https://doi.org/10.1007/s11947-011-0758-5
2. Ayoubi, A., Sedaghat, N., & Kashaninejad, M. (2015). Study the effect of different pretreatments on thin layer drying of grape and the color of obtained raisin. *Research and Innovation in Food Science and Technology*, *4*(1), 1-18. https://doi.org/10.22101/JRIFST.2015.05.10.411
3. Bai, J. W., Sun, D. W., Xiao, H. W., Mujumdar, A., & Gao, Z. J. (2013). Novel high-humidity hot air impingement blanching (HHAIB) pretreatment enhances drying kinetics and color attributes of seedless grapes. *Innovative Food Science & Emerging Technologies* 20, 230-237. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2013.08.011
4. Bai, J. W., Gao, Z. J., Xiao, H. W., Wang, X. T., & Zhang, Q. (2013). Polyphenol oxidase inactivation and vitamin C degradation kinetics of F uji apple quarters by high humidity air impingement blanching. *International Journal of Food Science & Technology*, *48*(6), 1135-1141. https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2012.03193.x
5. Crank, J. (1979). *The mathematics of diffusion*. Oxford university press.
6. Dai, J. W., Wang, J., Yang, S. L., Wen, M. D., Yin, P. F., Qin, W., Liu, Y. W., Liu, Q., Liu, S. X., & Xu, L. J. (2020). High humidity air-impingement blanching (HHAIB) improves drying characteristics and quality of ground-cover chrysanthemum heads. *International Journal of Food Engineering*, *16*(12). https://doi.org/10.1515/ijfe-2020-0121
7. De Roeck, A., Sila, D. N., Duvetter, T., Van Loey, A., & Hendrickx, M. (2008). Effect of high pressure/high temperature processing on cell wall pectic substances in relation to firmness of carrot tissue. *Food Chemistry*, *107*(3), 1225-1235. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2007.09.076
8. Dehbooreh, R., & Esmaiili, M. (2009). Evaluation of Microwave and Convective Finish Drying Parameters and Drying Effects on Color of Dried Grapes. *Iranian Food Science and Technology Research Journal*, 5(2). https://doi.org/10.1590/1678-4324-2022210614
9. Deng, L. Z., Mujumdar, A., Yang, X. H., Wang, J., Zhang, Q., Zheng, Z. A., Gao, Z. J., & Xiao, H. W. (2018). High humidity hot air impingement blanching (HHAIB) enhances drying rate and softens texture of apricot via cell wall pectin polysaccharides degradation and ultrastructure modification. *Food Chemistry*, *261*, 292-300. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.04.062
10. Dev, S., Padmini, T., Adedeji, A., Gariépy, Y., & Raghavan, G. (2008). A comparative study on the effect of chemical, microwave, and pulsed electric pretreatments on convective drying and quality of raisins. *Drying Technology*, *26*(10), 1238-1243. https://doi.org/10.1080/07373930802307167
11. Di Matteo, M., Cinquanta, L., Galiero, G., & Crescitelli, S. (2000). Effect of a novel physical pretreatment process on the drying kinetics of seedless grapes. *Journal of Food Engineering*, *46*(2), 83-89. https://doi.org/10.1016/S0260-8774(00)00071-6
12. Doulati Baneh, H. (2016). *the Grapevine Comperhensive Management of Growling, Production and Processing*: University of Kurdistan Press.
13. Earle, R. L. (2013). *Unit operations in food processing*. Elsevier.
14. Gao, Z., Xiao, H., Liu, B., & Yang, W. (2008). A no nutritional loss and non-fried sweet potato chips processing method. *China Patent No. ZL200810116897* 9.
15. Jayaprakasha, G. K., Singh, R. P., & Sakariah, K. K. (2001). Antioxidant activity of grape seed (Vitis vinifera) extracts on peroxidation models in vitro. *Food Chemistry*, *73*(3), 285-290. https://doi.org/10.1016/S0308-8146(00)00298-3
16. Kondjoyan, A., Chevolleau, S., Grève, E., Gatellier, P., Santé-Lhoutellier, V., Bruel, S., Touzet, C., Portanguen, S., & Debrauwer, L. (2010). Formation of heterocyclic amines in slices of Longissimus thoracis beef muscle subjected to jets of superheated steam. *Food Chemistry*, *119*(1), 19-26. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.02.081
17. Liu, Z. L., Bai, J. W., Yang, W. X., Wang, J., Deng, L. Z., Yu, X. L., Zheng, Z. A., Gao, Z. J., & Xiao, H. W. (2019). Effect of high-humidity hot air impingement blanching (HHAIB) and drying parameters on drying characteristics and quality of broccoli florets. *Drying Technology*. https://doi.org/10.1080/07373937.2018.1494185
18. Madamba, P. S., Driscoll, R. H., & Buckle, K. A. (1996). The thin-layer drying characteristics of garlic slices. *Journal of Food Engineering*, *29*(1), 75-97. https://doi.org/10.1016/0260-8774(95)00062-3
19. Martin, H. (1977). Heat and mass transfer between impinging gas jets and solid surfaces in. *Advances in heat transfer* (vol. 13). (pp. 1-60) Elsevier.
20. Moelants, K. R., Cardinaels, R., Van Buggenhout, S., Van Loey, A. M., Moldenaers, P., & Hendrickx, M. E. (2014). A review on the relationships between processing, food structure, and rheological properties of plant-tissue-based food suspensions. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, *13*(3), 241-260. https://doi.org/10.1111/1541-4337.12059

21. Olsson, E., Trägårdh, A., & Ahrné, L. (2005). Effect of near-infrared radiation and jet impingement heat transfer on crust formation of bread. *Journal of Food Science*, *70*(8), e484-e491. https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2005.tb11519.x
22. Rico, D., Martín-Diana, A. B., Barry-Ryan, C., Frías, J. M., Henehan, G. T., & Barat, J. M. (2008). Optimisation of steamer jet-injection to extend the shelflife of fresh-cut lettuce. *Postharvest Biology and Technology*, *48*(3), 431-442. https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2007.09.013
23. Sarkar, A., & Singh, R. P. (2004). Air impingement technology for food processing: visualization studies. *LWT-Food Science and Technology*, *37*(8), 873-879. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2004.04.005
24. Schabel, W., & Martin, H. (2010). G10 Impinging jet flow heat transfer in. *VDI Heat Atlas*.
25. Sui, M., Gao, Z., Ni, Z., & Fang, X. (2008). Study on relationship of temperature and puffing in roasting process of Peking duck with air impingement. *Journal of Food Science and Technology (China)*, *10*, 68-70.
26. Swati, K., & Ashim, D. (2014). *Modeling Mechanical Property Changes During Heating of Carrot Tissue -A Microscale Approach*. COMSOL Conference. Boston.
27. Thorat, I. D., Mohapatra, D., Sutar, R., Kapdi, S., & Jagtap, D. D. (2012). Mathematical modeling and experimental study on thin-layer vacuum drying of ginger (*Zingiber officinale* R.) slices. *Food and Bioprocess Technology*, *5*(4), 1379-1383. https://doi.org/10.1007/s11947-010-0429-y
28. Wang, H., Xiao, H. W., Liu, Z. L., Yu, X. L., Zhu, G. F., & Zheng, Z. (2019). *Effect of drying and high-humidity hot air impingement blanching (HHAIB) parameters on drying characteristics and quality of apple slices*. Pages 1. 2019 ASABE Annual International Meeting: American Society of Agricultural and Biological Engineers. https://doi:10.13031/aim.201900524
29. Wang, J., Fang, X. M., Mujumdar, A., Qian, J. Y., Zhang, Q., Yang, X. H., Liu, Y. H., Gao, Z. J., & Xiao, H. W. (2017a). Effect of high-humidity hot air impingement blanching (HHAIB) on drying and quality of red pepper (*Capsicum annuum* L.). *Food Chemistry*, 220, 145-152. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.09.200
30. Wang, J., Mu, W. S., Fang, X. M., Mujumdar, A., Yang, X. H., Xue, L. Y., Xie, L., Xiao, H. W., Gao, Z. J., & Zhang, Q. (2017b). Pulsed vacuum drying of Thompson seedless grape: Effects of berry ripeness on physicochemical properties and drying characteristic. *Food and Bioproducts Processing*, *106*, 117-126. https://doi.org/10.1016/j.fbp.2017.09.003
31. Xiao, H. W., Pang, C. L., Wang, L. H., Bai, J. W., Yang, W. X., & Gao, Z. J. (2010). Drying kinetics and quality of Monukka seedless grapes dried in an air-impingement jet dryer. *Biosystems Engineering*, *105*(2), 233-240. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2009.11.001
32. Xiao, H. W., & Mujumdar, A. (2014). *Impingement Drying: Application and Future Trends*.
33. Xiao, H. W., Yao, X. D., Lin, H., Yang, W. X., Meng, J. S., & Gao, Z. J. (2012). Effect of SSB (superheated steam blanching) time and drying temperature on hot air impingement drying kinetics and quality attributes of yam slices. *Journal of Food Process Engineering*, *35*(3), 370-390. https://doi.org/10.1111/j.1745-4530.2010.00594.x
34. Zielinska, S., Cybulska, J., Pieczywek, P., Zdunek, A., Kurzyna-Szklarek, M., Liu, Z. L., Staniszewska, I., Pan, Z., Xiao, H. W., & Zielinska, M. (2022). The effect of high humidity hot air impingement blanching on the changes in molecular and rheological characteristics of pectin fractions extracted from okra pods. *Food Hydrocolloids*, *123*, 107199. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.107199